

DOI: 10.5846/stxb201503260580

彭建, 赵会娟, 刘焱序, 杜悦悦. 区域水安全格局构建: 研究进展及概念框架. 生态学报, 2016, 36(11): - .

Peng J, Zhao H J, Liu Y X, Du Y Y. Progress and conceptual framework of regional water security pattern construction. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

区域水安全格局构建: 研究进展及概念框架

彭建^{1,2,*}, 赵会娟², 刘焱序¹, 杜悦悦¹

1. 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

2. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055

摘要: 随着全球变化背景下生态安全问题的日益严峻, 生态安全格局研究成为宏观生态学关注的热点领域; 水作为重要的自然生态要素, 其安全格局的构建也是区域生态安全格局优化的重要组成部分, 但目前其基本内涵、构建理论与方法、指标体系等尚未受到足够重视, 缺乏系统梳理。本文在对比分析资源、环境与灾害等多学科视角下水安全概念异同的基础上, 初步明晰了区域水安全格局的概念内涵, 将其定义为保障区域水安全目标的土地利用空间格局; 系统探讨了水安全格局构建历程与方法研究进展, 指出水安全研究正由定量评价向空间管控转型, 水环境安全格局构建严重滞后, 缺乏水安全格局与自然生态过程、社会经济过程的耦合关联分析; 最后, 基于景观生态学格局-过程互馈理论和地理学区域综合视角, 以 GIS 空间分析、InVEST 模型等为技术支撑, 构建了水资源安全、水环境安全和水灾害规避安全三个单一维度的水安全格局, 并提出基于空间多准则分析模型的区域综合水安全格局构建概念框架, 以期有效提升中国城市化进程的水安全格局保障。

关键词: 水安全格局; 水资源安全; 水环境安全; 水灾害规避安全; 概念框架; 研究进展

Progress and conceptual framework of regional water security pattern construction

PENG Jian^{1,2,*}, ZHAO Huijuan², LIU Yanxu¹, DU Yueyue¹

1 Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2 Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

Abstract: With the background of global change, ecological security has become an increasingly prominent issue and has been an important constraint to economic development and social stability. As serious problems in ecological security have increased, ecological security pattern is receiving widespread attention, particularly in the field of macroscopic ecology. Water security pattern is an important part of the ecological security pattern, and a complete understanding of the pattern would be useful in policymaking. It would also help in solving the problem of water security by providing spatial identification and protection. However, previous research have not provided a clear definition of water security pattern, and this may be partly because of insufficient focus on it. Therefore, its theoretical basis, methodology, and assessment indicators are important factors that need to be explored further. A new approach is necessary to carry out an in-depth study that will be helpful for further enhancing the process of urbanization and protecting natural ecosystems in China. In this study, the similarities and differences between water security and related concepts such as water resource security, water environmental security, flood evasion security, and water ecological security were compared and analyzed. The results were then integrated with water security data from a multi-disciplinary perspective. Based on the comprehensive view, a

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41271195)

收稿日期: 2015-03-26; 修订日期: 2015-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

fundamental concept of regional water security pattern was also defined. From a narrow point of view, it can be defined as the key landscape elements aiming to protect regional water security. From multidisciplinary and wide points of view, water security pattern construction can be defined as the regional landscape pattern optimization and optimal allocation of land resources. Regional water security pattern is concerned with ensuring a stable supply of regional water resources and maintaining the quality of the water environment, and at the same time, with avoiding disasters related to water to the greatest extent. The latest progress in development procedure and research methodology of water security pattern construction was systematically sorted, and the results indicated that the trend of research was changing from quantitative evaluation to spatial analysis. The focus on construction of water environmental security pattern was insufficient in previous studies. Moreover, there was an urgent requirement for analyzing relationships between water security pattern and social-economic-Nature ecosystems. Therefore, supported by a spatial analysis and the InVEST model, a three-dimensional water security pattern, which included water resources security, water environmental security, and flood evasion security, was proposed. An integrated framework for regional water security pattern construction was also introduced on the basis of the three single dimensional water security patterns obtained from the multi-criteria decision analysis (MCDA) model. This new approach would be a great help to guarantee and promote China's water security in the process of urbanization.

Key Words: water security patterns; water resource security; water environmental security; flood evasion security; conceptual framework; research progress

近几十年来随着全球环境变化速度与强度的益发增强,自然生态系统的结构与功能遭到严重破坏,生态安全问题日益突出,自 20 世纪 90 年代以来逐渐成为宏观生态学的研究热点^[1-3]。作为区域、国家社会经济维系与可持续发展的基础,生态安全的思想萌芽最早发轫于 20 世纪 40 年代^[2];狭义的生态安全指生态系统的健康和完整状况,而广义的生态安全则指由自然生态安全、经济和社会生态安全三方面构成的复合人工安全系统^[3]。数量结构和空间格局是影响其发展的两个基本方面,这在学术界已达成普遍共识^[4]。其中,生态安全格局的构建通过对区域生态系统的数量结构与空间格局优化,已成为陆地生态系统保护屏障建设的有效途径,已有学者具体针对生态安全格局概念及其构建理论与方法开展了深入探讨^[5],并进行了不同尺度的多类型区域个案研究^[6-7]。

水作为重要的战略资源,与社会经济发展紧密相关,是维系人类可持续发展的重要命脉。但在当前快速城市化进程中,水源涵养功能减弱、水质污染、洪涝灾害频发等一系列水安全问题的出现,对区域生态安全、粮食安全甚至国家安全造成了重大影响^[8],水安全问题越来越成为全世界关注的焦点。我国水安全形势更是不容乐观:一方面,水资源严重短缺,人均水资源仅为世界平均水平的 1/4,全国年平均缺水量近 400 亿 m^3 ^[9];水环境保护形势依旧严峻,水污染事件频发,2014 年兰州“4.11”自来水苯含量超标事件更是引发了人们对水质安全问题的高度关注^[10];全国有超过 100 个大中城市处于洪水水位之下,洪灾潜在损失巨大^[11],1950—2008 年全国年均洪涝受灾面积 5418 km^2 ,死亡人口 4661 人^[12]。另一方面,通过自然界的水循环,水资源短缺、水环境污染及水灾害规避之间又存在密切的相互关联,因此寻求水安全问题的综合解决途径迫在眉睫。水作为生态系统中的核心要素之一,其安全格局的构建作为景观生态安全格局的空间优化途径之一,通过对维护区域水安全具有关键意义的节点、斑块与廊道的识别、重构,为区域水安全问题的解决提供了新的综合视角。

但是,相对于景观生态安全格局从理论探讨到实践应用的普遍关注,目前水安全格局的研究尚未受到足够重视,在水安全格局构建的理论与方法方面仍有待深入探讨。因此,本文在初步明晰区域水安全格局相关概念内涵的基础上,系统梳理水安全格局构建的现今进展,并在水资源安全格局、水环境安全格局和水灾害规避安全格局构建方法探讨的基础上,提出基于空间多准则分析的区域综合水安全格局构建概念框架,以期整体推进我国水安全格局研究的深入。

1 水安全与水安全格局

“水安全”一词在国际上最早出现于 2000 年斯德哥尔摩水论坛^[13]。自水安全议题提出以来,国内外学者重点围绕水资源安全概念界定^[14]、水资源安全评价指标体系^[15-16]、水环境质量评价^[17-18]以及洪涝安全管理与应急预案^[11,19]等方面开展了大量理论方法及个案研究,从水资源、水环境及水灾害规避等方面有效提升了全社会对水安全问题的关注。

近年来,不同学者基于多学科视角,对水安全及其关联概念进行了界定;根据关注点的不同,可将其归纳为水资源安全、水生态安全、水环境安全、水灾害规避安全及水安全 5 类(表 1)。其中,水资源安全涉及社会安全、经济安全和生态安全等多个维度,其实质是对水资源能否满足合理的社会、经济及生态用水需求的综合评判,最终目标在于解决水资源量的可持续供给问题;而水生态安全概念所强调的生态用水安全是对维持生态环境系统稳定和可持续发展用水的度量,从供需的角度讲,是水资源管理的重要内容和水资源配置的依据之一^[20],因此可将其纳入水资源安全范畴。相较而言,水环境安全重点关注水质污染和水环境整体安全状况,水灾害规避安全则主要涉及不同尺度、不同地域的洪涝灾害风险的定性、定量评估及其综合管理与防范。由于水生态系统本身的复杂性和不同研究方向侧重点的差异,当前对水安全概念的界定尚不统一,亟需耦合资源、环境、生态、灾害等多维度综合定义水安全。整合水安全相关概念,可将水安全定义为区域水资源在特定水质条件下保障自然生态系统及人类社会经济系统正常运行的生产、生活和生态用水需求,并确保水灾害风险最小化的一种可持续状态。也可以说,水安全是资源利用、环境保护、灾害规避多维综合视角下,对水生态系统整体健康状况的一种系统评判。目前,国际水安全研究重点强调特定时空范围水安全状况的定量评价,区域水安全问题的人为、自然影响因素及其驱动机制识别,但对水资源、环境、灾害规避等问题的交互作用及区域整合策略关注不足,缺乏对研究结果的空间可视化表达,因而难以明晰区域水安全的空间格局保障。

表 1 不同学科视角下的水安全相关概念对比

Table 1 The contrast of water security and related concepts under multidisciplinary perspectives

相关概念 Related concepts	学科依托 Subject basis	关注点 Focus	提出背景 Background
水资源安全 ^[14-16] Water resource security	资源科学	社会经济水资源量供需均衡	生产、生活可用水资源日益匮乏、水资源供需失衡
水生态安全 ^[20] Water ecological security	生态学	生态系统需水量及供需均衡	干旱胁迫下的自然生态系统脆弱性
水环境安全 ^[17-18] Water environmental security	环境科学	水质污染和流域水环境质量	水污染加剧、水环境质量日益恶化
水灾害规避安全 ^[19] flood evasion security	灾害学	洪涝灾害风险管理与防范	洪涝灾害频繁,损失严重
综合水安全 ^[21] Integrated water security	多学科综合	水资源、环境、生态安全与灾害风险的综合集成	水安全问题的多样性与复杂性,需要综合集成途径

水安全格局是随着生态安全格局研究的开展而逐步受到重视的,其与生物多样性安全格局、水土保持安全格局、粮食供给安全格局和地质灾害安全格局等共同构成区域生态安全格局。借鉴生态安全格局的研究视角和构建思路,水安全格局构建实质代表了水安全研究由定量评价向空间管控和格局保障研究的转型。但迄今为止,水安全格局都只是作为区域生态安全格局构建框架中的一部分,专门研究水安全格局构建的文献尚较鲜见,仍缺乏普遍认同的水安全格局概念。简单的说,水安全格局就是保障区域水安全目标的土地利用空间格局,而水安全格局构建则可以界定为特定时空范围内,以解决区域水资源、水环境与水灾害等耦合交错的重点水安全问题为导向,从区域景观格局优化与调控、土地资源优化配置等途径入手,基于多学科、多视角对维护区域水安全具有关键意义的空间单元及其要素属性和组合特征进行的土地利用或者景观要素空间配置。区域水安全格局能够最大程度地保障区域水资源供给、维持水环境质量和规避水灾害风险,从而满足不同使

用者的多重水功能需求,切实提升区域水生态系统可持续性。因此,区域水安全格局强调土地利用空间格局及其动态变化和特定生态功能的发挥,将地方或次区域的水安全问题在区域集成,以空间化的整合视角识别维系区域水安全的关键要素和空间位置,建立起水生态系统服务与区域空间规划之间的连接桥梁,致力于促进人类社会与水资源、环境、灾害耦合系统的多要素优化配置,是区域生态安全格局的重要组成部分。

2 水安全格局构建研究进展

2.1 水安全格局构建研究历程

水安全格局构建作为水资源保护及其空间规划的新途径,其实质是基于区域现状基底分析的土地利用格局优化,并建立面向区域可持续发展的生态空间管制机制。尽管目前尚无体系化的理论框架和研究方法来支撑综合水安全格局的研究,但以景观要素空间配置和格局优化为手段的生态基础设施及与之相关的理念,如绿色通道、绿带和生境网络等,为水安全格局的构建提供了一定的理论支持。生态基础设施的概念最早见于联合国科教文组织“人与生物圈计划”1984年发布的生态城市规划报告中,2002年被我国学者引入国内^[22];该概念强调优先保护和建设重要的生态资源和维系生态系统的关键性格局^[23]。水作为生态基础设施的核心要素之一,水安全格局的构建被视为生态基础设施建设和生态网络建设的重要途径之一,即通过对汇水节点、河道、湿地和潜在洪水淹没范围等要素的空间规划与优化配置,构建不同层次等级的生态节点、生态廊道和生态网络,从而实现水景观的连通和格局的优化,发挥防洪和水源保护等多项服务功能,提升区域水生态系统健康与安全水平。目前,国内学者基于生态基础设施理念研究水安全格局的案例仍较为鲜见,仅有陈璐青等基于防洪标准和对河流生态影响最小化原则进行滨水地区岸线规划,通过优化水系结构、连通河湖水系,增加蓄洪空间提高抗洪能力的途径来保障滨水区域的水安全^[24];许宏福等从水系统整体出发,在对大冶湖生态新区流域特征及其生态敏感性分析的基础上构建了耦合水功能区、汇水廊道、汇水节点和潜在洪水淹没范围的水安全格局^[25]。

水安全格局构建的目的在于维持区域生态格局与过程、提升生态恢复力,最终促进人居环境改善等人类福祉增益。区域生态安全格局的构建则往往伴随对具有某种重要生态系统服务的土地进行保护,在我国各层次区域规划实践中,不同尺度、不同类型的自然保护区、生态功能区、主体功能区和生态节点、轴线、廊道及其空间组合规划,对于水安全格局的构建也是一种有益探索。近年来在我国重点推进的生态功能区划与主体功能区规划,水一直是被关注的核心生态要素^[26]。并且,由于以反映生态系统综合特征和功能为目的生态区划和主体功能区规划单元往往不能直接作为水资源管理的空间单元,国家在生态区划的基础上还进一步开展了流域水生态功能分区、水环境功能区划、水生态区划等研究,并在辽河^[27]、太湖^[28]等地进行了实践应用。这些工作为开展水安全格局的研究和实践奠定了良好的基础,也为我国水资源的科学管理积累了宝贵经验;但是,现有水生态区划重点强调水体的资源功能、环境质量,忽视水文调节、洪水调蓄等非供给类生态系统服务,且对非水体的水源涵养功能关注不足。总体来说,生态基础设施建设和各类功能区划分等工作的开展对区域水安全格局的构建提供了一定的参考,但目前相对完整的水安全格局理论体系尚未真正建立,仍需深入探讨。水安全格局构建研究的深入开展不仅可与生态基础设施等相关理论互为补充,还可为区域生态安全格局构建及自然区划、生态功能区划等工作提供服务,共同为我国城市化进程的安全有序推进提供空间保障。

2.2 水安全格局构建方法

目前,水安全格局研究尚处于探索阶段,如何合理选择和表征区域水安全格局的量化因子是当前迫切需要突破的关键环节。尽管水安全格局构建尚无统一范式,但已有研究大多从水资源保有量与洪涝规避两方面选取相关定量指标并关注其空间可视化。例如,苏泳娴等在防洪安全格局构建的基础上叠加水源地保护区构建水安全格局^[29];俞孔坚等综合叠加水源涵养区和冰川、湿地空间分布构建了国土尺度上的水源涵养安全格局,进而选取洪水淹没范围、湖泊、湿地和蓄滞洪区等指标度量洪水调控安全格局^[30];在区域尺度上,综合考量径流、雨洪淹没、历史洪涝灾害和地下水补给适宜性构建了北京市水安全格局^[31];李咏红等综合考虑水源

涵养功能和城市水源、洪水调蓄、湖泊水库水源集水区以及河岸带等要素构建成渝经济区水安全格局^[32];曹艳群等则在河流、湿地、径流和洪涝易发区等要素敏感性分析的基础上构建了长沙市苏托垵水安全格局^[33]。

综上所述,水资源安全格局构建大多围绕饮用水源地保护区、水源涵养功能及冰川、湖泊、湿地、河流等水体分布因素;水灾害规避安全格局构建则主要考虑洪涝淹没范围、洪水源汇点与河湖缓冲区等因素;由于水环境系统以及水陆交互作用机理的复杂性,水环境安全格局的研究相对滞后,当前主要开展基于源汇景观的水环境污染分析^[34]与河湖重点敏感岸段识别^[35],如何基于河湖水环境敏感性构建水环境安全格局成为未来研究的重点趋向之一。总体来看,为数不多的既有研究为水安全格局构建提供了一定的思路借鉴,但按照综合水安全格局的概念内涵,水安全格局的度量应当包含水资源、水环境和水灾害规避三个单一维度的安全格局;然而,当前已有研究多集中在水资源安全格局、水灾害规避安全格局等单一维度或两者的整合上,对综合水安全格局构建指标缺乏系统梳理,且忽视了水安全空间格局与其他生态过程的相互作用机制,缺乏与所在区域社会经济耦合关联分析。值得关注的是,武彤等综合考虑了雨洪安全、水质安全和水环境安全三个层面构建了哈尔滨市阿城区综合水安全格局,但不足的是,选取指标相对单一,且水环境安全格局的构建仅考虑了水源地保护和河流水系要素,未能将水质指标纳入综合水安全研究^[36]。

对比分析相关研究案例,可以发现,尽管水安全格局构建视角、方法各异,但均包含适宜性评价、过程分析与模拟、空间识别与可视化表达三个核心步骤。其中,适宜性评价是区域水安全格局构建的基础,主要基于区域环境本底,定量评价区域开发利用的适宜性及制约因素等;过程分析与模拟是水安全格局构建的核心环节,一般结合 GIS 技术手段对洪水淹没、地表径流等自然过程进行定量分析和模拟;空间识别则主要识别保护的“源”和对保障生态过程具有重要意义的空间要素与格局,是水安全格局构建过程中数据分析、结果表达等必不可少的步骤。

综上所述,可以认为当前水安全格局构建的理论和指标体系尚不成熟,水安全格局对于水安全的保障机理还有待进一步深入探讨;并且,不同地区面临的水安全问题不同,生态安全基底条件与特征需求也不尽相同,其水安全格局的构建方法、途径亦会有所差异,如何建立具有区域特色的水安全格局空间直观模型为区域水安全的动态模拟和情景预测提供定量支持,成为当前研究的热点方向。

3 区域水安全格局构建概念框架

基于景观生态学格局-过程互馈理论和地理学区域综合视角,以 GIS 空间分析为技术支撑,针对区域水安全问题,通过从空间格局上定量刻画水生态系统服务相关景观要素特征,可以定量分析水生态过程与关联景观要素空间格局、区域地理背景的相互作用机理,判别维护上述过程安全的关键景观要素及其空间格局,识别水资源利用、水环境保护和水灾害规避三个单一维度的安全格局,并在对单一安全格局进行耦合关联探讨的基础上,采用多准则决策分析模型构建区域综合水安全格局。

3.1 水资源安全格局

水资源安全格局是指土地利用格局中保障区域人类社会合理的生产、生活用水,并维持自然生态系统结构、功能和过程生态用水的特定景观类型或关键空间位置。水资源安全格局侧重关注水资源量问题,水资源匮乏和不合理分配都会导致一系列问题的出现。水源涵养区是清洁水的来源,体现着生态系统服务对人类社会发展增益过程的贡献,因而,水源涵养区和其他对水源涵养功能具有重要影响的要素或位置是水资源安全格局构建不可或缺的因子。在社会经济系统中,城市雨水资源再利用不仅能够缓解城市排水系统的压力,同时也在一定程度上补充了社会经济需水量,在这一领域,德国、美国和日本等国的雨水资源收集、处理及再利用体系为我国提供了重要参考^[37];以供水为目的的雨水集流系统、输水系统和贮水系统等设施用地亦应在小尺度水资源安全格局考虑范畴之内。因此,水资源安全格局构建可以综合考虑水源涵养区、河湖湿地分布、雨水再利用设施空间布局和地表、地下水储量等指标,采用多要素加权叠置实现。

在水资源安全格局构建中,水源涵养区的识别至关重要,一般通过多指标定量评估区域水源涵养功能来

实现。目前,基于水量平衡原理的 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型水源涵养模块为定量评估水源涵养功能提供了有益补充。InVEST 模型目前在国内外得到了广泛应用,其中的水源涵养模块在维拉米特河流域^[38]、非洲西部加纳和科特迪瓦^[39]等地被用于模拟不同情景下的产水量,为自然资本管理提供依据。国内近年来相继有学者用其定量评估了澜沧江流域^[40]、北京山区^[41]、都江堰市^[42]等地水源涵养功能,研究表明 InVEST 模型在我国区域水源涵养功能评估方面具有良好的适用性。

3.2 水环境安全格局

水环境安全格局构建是指在明晰区域内各片区、河段水环境问题及其产生原因的基础上,识别有利于区域水质水环境质量维持或改善的关键空间位置及其土地利用/覆被配置,进而构筑由江河廊道、汇水点、湿地等共同组成的多层次水环境安全管控网络,从空间布局上实现点源、非点源污染分级调控。根据区域景观格局特征合理规划和配置景观要素,保持一定的生态廊道维持景观连接度的景观优化理论,目前被认为在水污染防控和水环境治理方面有着广阔的应用前景^[43]。例如,Sepplet 应用 GIS 和景观空间分异模型尝试解决美国南部 Hunting creek 小流域的水污染控制问题^[44];在国内,自然景观与人工景观此消彼长的景观格局演变对水环境产生的负效应已得到证实^[45],但运用景观规划手段改善河流水环境的研究仍很少见,只有周璟等根据流域水环境现状对沁河流域进行水环境约束分区并提出了相应的景观格局优化方案,以有效阻止污染物空间扩散、保障水环境安全^[46]。

水环境安全格局的构建是运用可持续发展的流域综合整治策略与生态规划理念,结合流域水质分析及水环境承载力评价,识别水环境敏感区域、污染物源头和输污路径,继而划定污染源重点控制区和重点输污生态控制线来实现。污染源重点控制区管控,主要是对流域水环境污染有重要影响的地类、岸段与支流河口进行重点防治,控制污染源,防止污染物进一步扩散;同时,对维持生物多样性与生态完整性有重要作用的支流、湿地、水库等景观类型实施重点保护。对径流污染物扩散、迁移有重要意义的沟渠、水道等景观单元,通过建立输污生态控制线,实现污染物输送路径的有效管控以削减入河污染负荷。水环境安全格局的构建将在区域内形成包含廊道、节点和重点保护斑块在内的水网恢复体系,在改善流域水质和水环境的同时发挥水源涵养、调节洪峰、生物多样性维持和景观连通作用,最终实现水环境要素在区域层面的统筹管理。

3.3 水灾害规避安全格局

在全球各类自然灾害造成的损失中,洪水占 40%^[11]。由于其发生频数高、损失大、影响范围广和巨大的危害性,使得洪涝灾害具有极高的关注度,其合理规避也成为水安全研究的核心目标之一。水灾害规避安全格局的构建从整个区域出发,识别并控制对防洪排涝具有关键意义的区域和空间位置,建立流域水文管理与蓄滞洪系统,从而使洪水自然宣泄具备充足的空间,最大程度减少洪涝灾害造成的自然或社会损失。目前,国际上越来越认识到单一工程措施防洪能力的有限性^[47],而通过合理规划区域河湖水网,发挥自然生态系统泄、排、蓄、滞的水文调节功能,已成为当前防洪减灾研究的重要趋向,海绵城市建设理念的提出就是雨洪利用理论的创新和发展^[48]。洪水淹没范围作为洪水汇集区,是洪水水情、地形地貌、土壤性质和防洪基础设施综合影响之下的结果。河流、湖泊、水库、坑塘等湿地系统则在调洪蓄洪方面具有重要作用,是流域防洪系统的重要组成部分。区域水灾害规避安全格局的构建,需要重点考虑上述两方面因素。

目前,洪水淹没范围的模拟主要包括经验水文模型和水动力数值法,但前者难以模拟洪水动态过程和空间分布,后者计算方法和过程复杂、数据处理难度大,因此两者的使用均受到了较大限制^[11]。近年来,基于 GIS 的空间分析则为洪水模拟与风险识别提供了一种新途径,刘仁义等提出了有源淹没、无源淹没两种情形下复杂地形洪水淹没区的种子蔓延算法^[49],丁志雄等^[50]、刘小生等^[51]分别运用 GIS 格网、不规则三角网模型模拟不同地区洪水淹没范围。因此,可采用 GIS 洪水模型模拟洪水溢出过程,确定积水深度和淹没面积,并参照历史洪涝灾害数据进行模型修正,综合确定洪涝淹没范围;对于具有调蓄功能的湖泊湿地,设置一定宽度的河湖缓冲带是规避洪涝灾害、减少损失的有效方法之一,而缓冲带的长度与宽度设置需要根据河湖大小级别、所处的地形等因素综合确定。将洪水淹没范围、河湖缓冲区分析结果和蓄滞洪区空间图层加权叠置,即可构

建区域水灾害规避安全格局。

3.4 综合水安全格局

区域综合水安全格局的构建是在社会经济系统与自然生态系统耦合作用下,根据研究区域内具体的生态环境特征,以水资源利用、水环境保护和水灾害规避三个单一的安全格局为基础,综合分析、交互权衡而成,是对维系区域水生态系统服务可持续性具有关键意义的景观斑块与廊道的识别与优化。目前,已有研究大多采用等权重法空间叠置来构建综合水安全格局^[29-32],该方法的优点是简便易用,但不同区域面临的水安全问题不同,水安全格局构建的指标体系选取相应存在差异;即使在同一个区域,不同类型的水安全问题也会有程度上的差异,因此等权重法无法体现出部分对于整体评价目标的贡献量值,且忽略了各指标间相互联系与影响,不尽合理。

多准则决策分析(Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA)则提供了综合考虑多种因素、多重标准前提下进行方案决策分析的有效方法,并能结合GIS灵活实现结果的空间可视化表达。MCDA的核心环节在于整合多个单一指标形成一个综合指标,指标权重确定仍是问题的关键所在。目前,权重的赋予有主观、客观赋权法两种,其中主观赋权法能够基本表征指标的重要性差异,但其缺点是根据主观经验判断、客观性相对较差;客观赋权法一般通过对评价指标原始值进行统计分析而得,权重的确定不受评价者主观判断影响、客观性强,但在某些情况下会出现模型结果与实际情况相反的情况^[52]。因此,各类权重赋予法各有优缺点和适应范围,在选用时应当依据区域水安全问题及研究目标的不同合理选取。

一般而言,区域综合水安全格局构建可归纳为以下四方面的主要环节(图1):(1)区域水安全问题诊断与识别。从资源、环境和灾害的视角对区域水安全问题进行识别与分析,并相应诊断其威胁来源;(2)单一过程水安全格局构建。选择有代表性、针对性的指标,采用多要素加权叠置法对各指标进行综合分析,构建单一过程水安全格局;(3)区域综合水安全格局构建。在三个单一安全格局基础上,采用多准则决策分析模型与综合交互权衡方法,结合GIS空间分析构建区域综合水安全格局;(4)分级分类管理体系建立。按照一定的安全标准划分水安全等级体系,实施有针对性的水安全管理策略,使不同等级、不同类型的水安全格局组分在

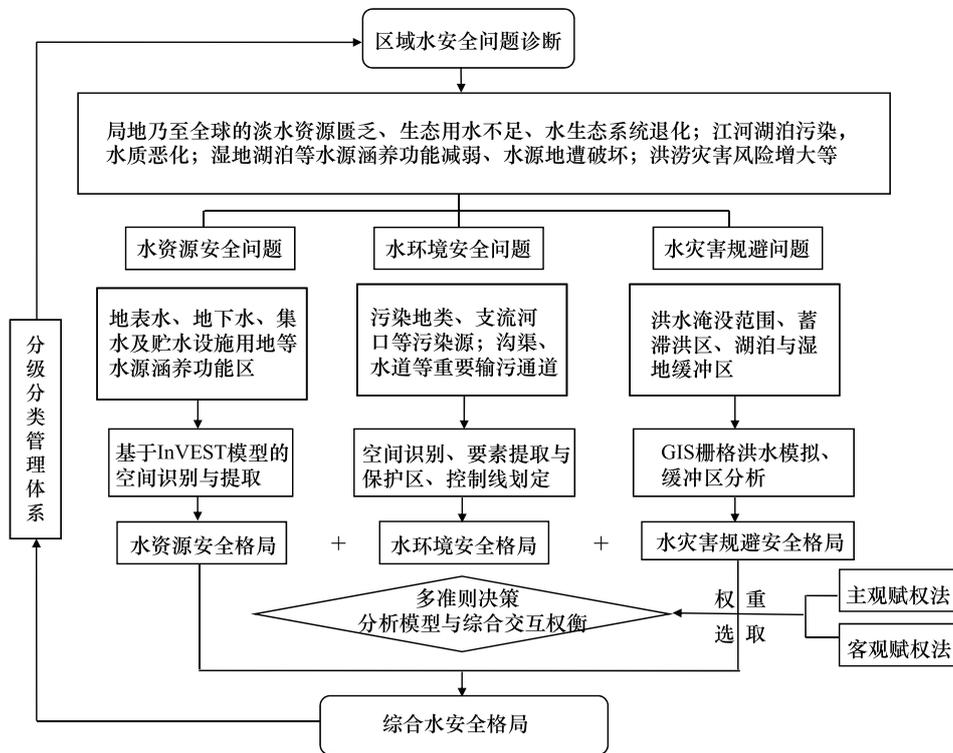


图1 区域综合水安全格局构建框架

Fig.1 The conceptual framework of regional water security patterns

经济发展和环境保护中的效益得到最大发挥,从而实现区域水安全格局的分级管理和分类整合。

4 结语

目前,水安全问题的解决迫在眉睫,已成为国际学术界和公众关注的焦点问题之一;而单纯的水安全问题诊断、评价显然不足以解决区域所面临的复杂水安全问题,尤其需要空间格局的水安全保障。构建水安全格局是有效解决区域水安全问题的重要途径,也是未来区域生态安全研究的热点领域之一,但目前其基础理论和技术方法等尚不成熟。本文初步明晰了水安全格局的概念内涵,并在系统梳理水安全格局相关研究进展的基础上,基于景观生态学格局-过程互馈理论与地理学区域集成视角,提出基于资源利用、环境保护和灾害规避等多视角耦合的区域综合水安全格局构建概念框架。

为了更好地满足适应性水生态系统服务管理的需求、切实应对区域水安全问题,水安全格局研究有待重点推进以下两个方面的内容:①理论与方法体系的深入探讨。需要重点深化区域水安全格局的概念内涵,明晰水安全格局构建的指标体系及其等级阈值,并根据社会经济发展对区域生态安全的新要求进行水安全格局的动态优化;②多学科交叉与融合。区域水安全格局研究涉及生态、环境、资源、灾害、社会、经济等多学科领域,实现多学科知识体系的融合与不同方法、技术手段的集成应用是其客观需要;而基于 GIS 技术综合集成,依托多学科专家知识库充分发挥模型模拟在水安全格局研究中的预测、解释功能,则是当前区域水安全格局构建的现时需要和发展趋势。

参考文献 (References):

- [1] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,关文彬. 区域生态安全格局:概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [2] Whitford W G, Rapport D J, DeSoyza A G. Using resistance and resilience measurements for 'fitness tests in ecosystem health. *Journal of Environmental Management*, 1999, 57(1): 21-29.
- [3] Dobson A P, Bradshaw A D, Baker A J M. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 1997, 277(5325): 515-522.
- [4] 刘洋,蒙古军,朱利凯. 区域生态安全格局研究进展. 生态学报, 2010, 30(24): 6980-6989.
- [5] 肖笃宁,陈文波,郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.
- [6] 方淑波,肖笃宁,安树青. 基于土地利用分析的兰州市城市区域生态安全格局研究. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2284-2290.
- [7] 陈利顶,吕一河,田惠颖,施茜. 重大工程建设中生态安全格局构建基本原则和方法. 应用生态学报, 2007, 18(3): 674-680.
- [8] Sinyolo S, Mudhara M, Wale E. Water security and rural household food security: empirical evidence from the Mzinyathi district in South Africa. *Food Security*, 2014, 6(4): 483-499.
- [9] 夏军,翟金良,占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考. 地球科学进展, 2011, 26(9): 905-915.
- [10] Dou M, Wang Y Y, Li C Y. Oil leak contaminates tap water: a view of drinking water security crisis in China. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(10): 4219-4221.
- [11] Yin Z E, Yin J, Xu S Y, Wen J H. Community-based scenario modelling and disaster risk assessment of urban rainstorm waterlogging. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 274-284.
- [12] 左海洋,阎永军,张素平,陈月华,陈敏,孙波,张怡. 新中国重大洪涝灾害抗灾纪实. 中国防汛抗旱, 2009, 19(A01): 20-38.
- [13] 方子云. 提供水安全是 21 世纪现代水利的主要目标——兼介斯德哥尔摩千年国际水会议及海牙部长级会议宣言. 水利水电科技进展, 2001, 21(1): 9-10.
- [14] 贾绍凤,张军岩,张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系. 地理科学进展, 2002, 21(6): 538-545.
- [15] Ohlsson L. Water conflicts and social resource scarcity. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2000, 25(3): 213-220.
- [16] 程国栋,赵传燕. 西北干旱区生态需水研究. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1101-1108.
- [17] Ferrier R C, Edwards A C, Hirst D, Littlewood I G, Watts C D, Morris R. Water quality of Scottish rivers: spatial and temporal trends. *Science of the Total Environment*, 2001, 265(1/3): 327-342.
- [18] 张小斌,李新. 我国水环境安全研究进展. 安全与环境工程, 2013, 20(1): 122-125.
- [19] 廖永丰,聂承静,杨林生,李海蓉. 洪涝灾害风险监测预警评估综述. 地理科学进展, 2012, 31(3): 361-367.

- [20] 苗鸿,魏彦昌,姜立军,欧阳志云,史俊通,王效科,赵景柱.生态用水及其核算方法.生态学报,2003,23(6):1156-1164.
- [21] 张翔,夏军,贾绍凤.水安全定义及其评价指数的应用.资源科学,2005,27(3):145-149.
- [22] 刘海龙,李迪华,韩西丽.生态基础设施概念及其研究进展综述.城市规划,2005,29(9):70-75.
- [23] Benedict M A, McMahon E T. Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century. Renewable Resources Journal, 2002, 20(3): 12-17.
- [24] 陈璐青,林晨薇,程维军.“一江两岸”滨水地区空间活化策略研究.城市建筑,2014,(10):73-77.
- [25] 许宏福,霍子文.基于水安全格局的湖泊型生态新区规划方法刍议——以湖北省黄石市大冶湖生态新区为例 // 城乡治理与规划改革——2014中国城市规划年会论文集.北京:中国城市规划学会,2014.
- [26] 樊杰.我国主体功能区划的科学基础.地理学报,2007,62(4):339-350.
- [27] 孟伟,张远,郑丙辉.辽河流域水生态分区研究.环境科学学报,2007,27(6):911-918.
- [28] 高永年,高俊峰.太湖流域水生态功能分区.地理研究,2010,29(1):111-117.
- [29] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,黄光庆,叶玉瑶,吴旗韬,黄宁生,匡耀求.佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案.生态学报,2013,33(5):1524-1534.
- [30] 俞孔坚,李海龙,李迪华,乔青,奚雪松.国土尺度生态安全格局.生态学报,2009,29(10):5163-5175.
- [31] 俞孔坚,王思思,李迪华,李春波.北京市生态安全格局及城市增长远景.生态学报,2009,29(3):1189-1204.
- [32] 李咏红,香宝,袁兴中,刘孝富.区域尺度景观生态安全格局构建——以成渝经济区为例.草地学报,2013,21(1):18-24.
- [33] 曹艳群,俞露.生态导向的城市空间规划及其生态效益评价——以湖南省长沙市苏托垅为例 // 城市时代,协同规划——2013中国城市规划年会论文集.北京:中国城市规划学会,2013.
- [34] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,巩杰.基于“源—汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数.生态学报,2003,23(11):2406-2413.
- [35] 尹海伟,徐建刚,陈昌勇,孔繁华.基于GIS的吴江东部地区生态敏感性分析.地理科学,2006,26(1):64-69.
- [36] 武彤,刘晓光,吴冰.哈尔滨市阿城区综合水安全评价与格局构建研究 // 中国风景园林学会2014年会论文集(上册).北京:中国风景园林学会,2014.
- [37] 刘小勇,吴普特.雨水资源集蓄利用研究综述.自然资源学报,2000,15(2):189-193.
- [38] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [39] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, Nalley L L. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 165: 6-18.
- [40] Chen L, Xie G D, Zhang C S, Pei S, Fan N, Ge L Q, Zhang C X. Modelling ecosystem water supply services across the Lancang river basin. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, 2(4): 322-327.
- [41] 余新晓,周彬,吕锡芝,杨之歌.基于InVEST模型的北京山区森林水源涵养功能评估.林业科学,2013,48(10):1-5.
- [42] 傅斌,徐佩,王玉宽,彭怡,任静.都江堰市水源涵养功能空间格局.生态学报,2013,33(3):789-797.
- [43] 岳隽,王仰麟,李贵才,吴健生.基于水环境保护的流域景观格局优化理念初探.地理科学进展,2007,26(3):38-46.
- [44] Seppelt R, Voinov A. Optimization methodology for land use patterns using spatially explicit landscape models. *Ecological Modeling*, 2002, 151(2/3): 125-142.
- [45] 黄硕,郭青海.城市景观格局演变的水环境效应研究综述.生态学报,2014,34(12):3142-3150.
- [46] 周璟,刘永,郭怀成,赵海生,颜小品,张祯祯.沁河流域水环境约束分区与景观格局优化.环境科学研究,2012,25(5):481-488.
- [47] Penning-Rowsell E C. Flood-hazard response in Argentina. *The Geographical Review*, 1996, 86(1): 72-90.
- [48] 莫琳,俞孔坚.构建城市绿色海绵——生态雨洪调蓄系统规划研究.城市发展研究,2012,19(5):中彩页4-中彩页8.
- [49] 刘仁义,刘南.基于GIS的复杂地形洪水淹没区计算方法.地理学报,2001,56(1):1-6.
- [50] 丁志雄,李纪人,李琳.基于GIS格网模型的洪水淹没分析方法.水利学报,2004,(6):56-60,67-67.
- [51] 刘小生,陈英俊,黄玉生.基于GIS技术的洪水淹没区确定.测绘科学,2007,32(5):136-137.
- [52] 彭建,吴健生,潘雅婧,韩忆楠.基于PSR模型的区域生态持续性评价概念框架.地理科学进展,2012,31(7):933-940.